



SOLUÇÃO DE CONTROLE DE VÁLVULAS PROPORCIONAIS USANDO SINAL PWM – CASO DO REGULADOR DE VELOCIDADE DE UMA TURBINA KAPLAN

Cristiano Bühler

Rafael de Paiva

Jonatan Reichert

Luiz Alberto Ventura

Márcio Ferreira

REIVAX S/A Automação e Controle

RESUMO

Muitos fabricantes de válvulas proporcionais fornecem o circuito eletrônico responsável por comandar a válvula (amplificação), a partir do sinal de controle proveniente do regulador, estando esse circuito acoplado ao corpo da válvula. Em alguns sistemas, modernos ou mais antigos, são utilizadas válvulas proporcionais que demandam amplificação externa do sinal de comando, chegando a sinais que podem atingir 5A de amplitude.

Tal sinal de acionamento possui característica DC, com valor médio variável, historicamente gerado utilizando circuitos baseados no transistor bipolar de junção (BJT). Nesse Informe Técnico será apresentada solução utilizando sinal de acionamento com formato PWM, baseado em transistor bipolar de porta isolada (IGBT), aplicada em uma usina hidrelétrica, no acionamento dos pistões de uma turbina Kaplan.

PALAVRAS-CHAVE

Regulador de Velocidade, Válvulas Proporcionais, PWM, Sistemas Hidráulicos, Turbina Hidráulica, Estabilidade de Sistemas de Potência.

1. INTRODUÇÃO

O controle da potência ativa e da velocidade de uma unidade de geração hidráulica depende de malhas de controle adequadamente implementadas e sintonizadas, bem como do circuito mecânico-hidráulico operando adequadamente. O conjunto dessas duas partes (controle e potência) é comumente chamado de sistema de regulação de velocidade.

A interface entre as partes de controle e potência (mecânica) é a válvula direcional proporcional, normalmente chamada de válvula proporcional, a qual recebe um sinal proveniente da parte eletrônica a fim de provocar movimento do pistão hidráulico, e por consequência, aumentar a vazão de água na turbina, que será traduzida em potência mecânica no eixo. No caso de uma turbina Kaplan, duas válvulas proporcionais estão presentes, já que se faz necessária a movimentação de dois pistões: distribuidor e pás.

Tipicamente, o sinal proveniente da parte de controle do regulador de velocidade possui um formato padrão, 4 a 20 mA ou -10V a +10V. Algumas válvulas proporcionais mais modernas possuem o driver de controle incorporado no corpo da mesma (OBE – *On Board Electronic*), que recebe o sinal de controle, amplifica e então posiciona o êmbolo da válvula, direcionando o óleo pressurizado para uma das câmaras do pistão hidráulico. No entanto, alguns tipos de válvulas não possuem eletrônica embarcada, necessitando, em alguns casos, sinal de controle com maior corrente, com amplitude que pode chegar a 5A.

O sinal de controle possui formato DC e, por vezes, recebe uma componente alternada (*Dither*), com a finalidade de evitar “agarramento” mecânico da válvula. A utilização do sinal tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) possui valor rms DC mas provoca pequenas oscilações no carretel da válvula, remetendo ao sinal *Dither*, sem no entanto provocar movimentação indesejada do pistão, já que a frequência de chaveamento está na casa de 1kHz.

O semicondutor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), acionado por sinal do tipo PWM, é muito utilizado em diversas aplicações, inclusive em reguladores de tensão, normalmente aplicados a excitatrizes rotativas. A utilização em reguladores de velocidade, para acionamento de válvulas, é aqui exposto de forma pioneira. Esse Informe Técnico apresenta a solução implementada na modernização (*retrofit*) parcial do regulador de velocidade de uma turbina Kaplan, onde foi substituído o antigo sistema de controle mas foi mantido o conjunto hidráulico.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento da solução proposta passou basicamente por três etapas: projeto, ensaios em laboratório e validação em campo.

A etapa de projeto consistiu na especificação do sistema de controle (regulador de velocidade) a fim de substituir o atualmente instalado na central. Dessa forma, foram especificados módulos eletrônicos programáveis juntamente com circuito eletrônico de potência (saída de, no mínimo, 5A nominais) para acionamento da válvula.

Os ensaios em laboratório visaram validar a solução, observando a correta operação da válvula, sem danos para a mesma, inclusive quanto à temperatura durante a operação.

Os ensaios em campo, associados ao comissionamento do novo regulador de velocidade, buscaram confirmar os resultados obtidos em laboratório.

3. CARACTERÍSTICAS DAS VÁLVULAS CONTROLADAS

No conjunto hidráulico original da usina estavam presentes duas válvulas proporcionais: uma para sistema hidráulico de simples efeito, para controle do distribuidor; e outra para sistema hidráulico de duplo efeito, para controle das pás da Kaplan. Ambas são acionadas através de sinais com amplitude próxima a 5A.

As principais características técnicas das válvulas estão apresentadas na Figura 1.

| CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS | | |
|---|-----------------------------|--------------------------|
| ED 25 SE – ED 25 DE | | |
| ☞ Curso | Curso nominal: | ± 5 mm |
| ☞ Mola de retorno | Pré-tensionamento: | 15 daN |
| | Flexibilidade: | 3,4 daN/mm |
| ☞ Bobina | Marca: | MECALECTRO |
| | Tipo: | B834BP41F |
| | Tensão nominal: | 12 V |
| | Tensão de isolamento: | 600 V |
| | Enrolamento: | classe F (155°C max.) |
| | Resistência ôhmica a 20°C: | 2 Ω ± 0,25 |
| | Resistência térmica: | 0,9 °C/W (montado no ED) |
| ☞ Corrente de manobra a pressão nula | Descolamento: | 3,0 A ± 0,2 |
| | Equilíbrio: | 3,8 A ± 0,2 |
| | Limitação de abertura: | 4,6 A ± 0,2 |
| ☞ Pressão máxima | Orifícios P, A, B, T, R, L: | 250 bar |
| | Orifício V: | 0 bar |
| ☞ Pressão mínima | Regulação: | 0 bar |
| | Comando de segurança: | 15 bar (orifício L) |

FIGURA 1 – Características construtivas das válvulas

Uma válvula para sistema hidráulico de simples efeito controla a pressão de óleo em uma das câmaras do pistão hidráulico, enquanto que a outra câmara permanece com pressão constante. Esse tipo de acionamento pode ser aplicado a defletores de turbinas tipo Pelton e distribuidores de turbinas tipo Francis e Kaplan. É muito comum esse tipo de acionamento em válvulas distribuidoras, aplicadas a sistemas onde o volume de óleo para acionamento do pistão hidráulico é muito grande, funcionando como um amplificador hidráulico.

Já uma válvula para sistema hidráulico de duplo efeito injeta óleo pressurizado em uma das câmaras do pistão hidráulico, conectando a outra câmara ao circuito de retorno ao tanque (óleo com pressão menor). As conexões com o óleo pressurizado ou com o tanque são dadas a partir da posição do carretel da válvula, que depende do sinal de controle proveniente do regulador.

A simbologia das válvulas aplicadas no projeto, de simples efeito e duplo efeito, está mostrada na Figura 2.

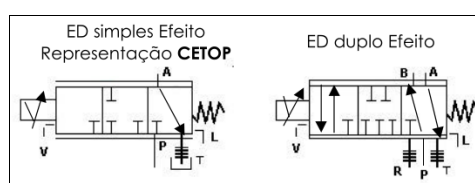


FIGURA 2 – Simbologia das válvulas

4. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Ensaios em Laboratório

3.1.1. Detalhes da Instalação

Após a confecção do projeto do novo sistema de controle, tendo sido especificado o conjunto de componentes a ser aplicado (módulos eletrônicos, componentes mecânicos), foram realizados testes em laboratório para validação do correto funcionamento da válvula proporcional operando acionada por sinal do tipo PWM. Para os ensaios em laboratório, foram utilizados os componentes citados na Tabela 1.

TABELA 1 – Componentes utilizados nos ensaios em laboratório

| N | Qtde | Nome | Descrição | Marca |
|----|------|------------------|----------------------------------|-----------------|
| 1 | 01 | CPX05 | Controlador programável | REIVAX |
| 2 | 01 | MAC01 | Módulos de entradas e saídas | REIVAX |
| 3 | 02 | ISO02 | Isolador de sinais | REIVAX |
| 4 | 01 | DRV01 | Driver de potência IGBT 25A | REIVAX |
| 5 | 01 | Fonte | Fonte de alimentação 24Vcc – 10A | Phoenix Contact |
| 6 | 01 | UH | Unidade Hidráulica 80 a 100bar | ECO Sistemas |
| 7 | 01 | VD1 | Válvula ED 25 DE | ALSTOM |
| 8 | 01 | VD2 | Válvula ED 25 SE | ALSTOM |
| 9 | 01 | Atuador | Atuador Hidráulico (curso 200mm) | Parker |
| 10 | 01 | Transdutor | Transdutor de Posição BTL6-200mm | Balluff |
| 11 | 01 | Osciloscópio | Osciloscópio U1604B | Agilent |
| 12 | 01 | Multímetro | Multímetro ET-2231 | Minipa |
| 13 | 01 | Termovisor | Termovisor TI10 | Fluke |
| 14 | 01 | Termo-higrômetro | Relógio termo-higrômetro MT-241 | Minipa |
| 15 | 01 | Termômetro | Termômetro PT100 | GulTerm200 |

Para os testes, foram montados dois sistemas separados: o circuito de controle (eletrônico) e o conjunto hidráulico (mecânico).

O circuito eletrônico de controle é formado pelo CLP programável (CPX05), onde foram implementadas todas as lógicas e malhas de controle, pelo módulo de entradas e saídas (MAC01), responsável por receber o sinal analógico de realimentação de posição e enviar o sinal analógico de controle, e pelo módulo de potência (DRV01), baseado em IGBTs e projetado para operação de até 25A de saída.

O circuito hidráulico é formado pela unidade hidráulica, pistão hidráulico, transdutor de posição, válvula proporcional, mangueiras e conexões. Foi aplicada pressão de 100bar ao circuito, para simular a condição real de operação da válvula proporcional.

Fotos dos ensaios em laboratório estão apresentadas na Figura 3. Uma vista geral do laboratório é mostrada na Figura 3a, e detalhes das partes eletrônica (comando) e mecânica (sistema hidráulico) são apresentados nas Figuras 3b e 3c.

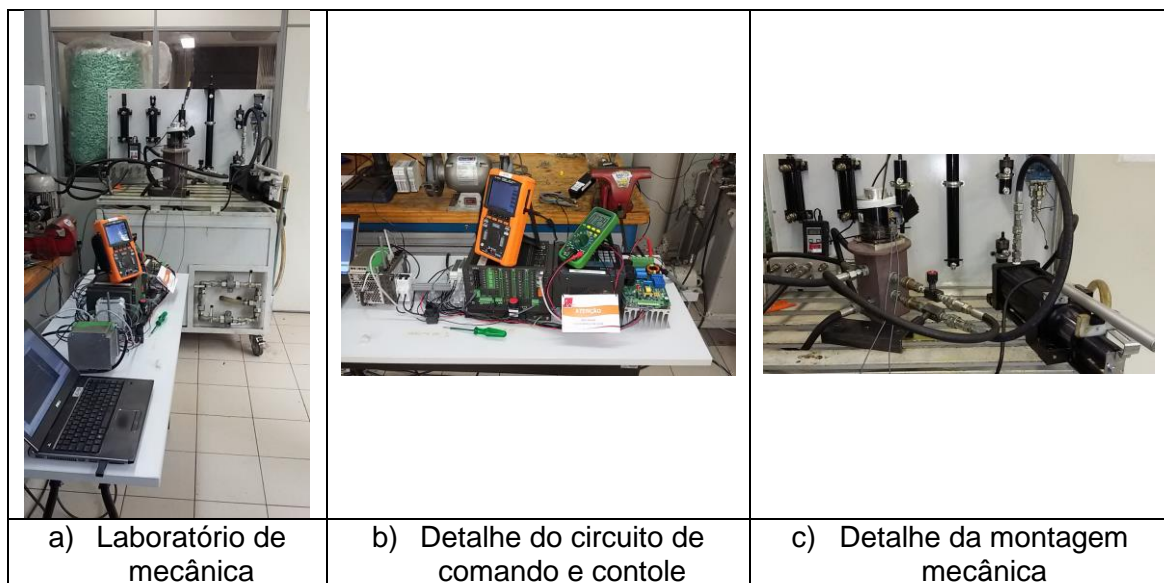


FIGURA 3 – Ensaios em laboratório

3.1.2. Resultados dos Ensaios em Laboratório

Os primeiros testes realizados foram buscando encontrar o centro mecânico, ou ponto de equilíbrio, da válvula proporcional. Para tal teste foi utilizada a função do regulador de velocidade chamada Comando Direto, a qual permite aplicar um determinado sinal de controle diretamente à válvula.

O mesmo teste foi realizado com as duas válvulas: a do distribuidor (simple efeito) e a das pás da Kaplan (duplo efeito). Ambas apresentaram comportamento semelhante.

Detectou-se que a válvula não possui um ponto de equilíbrio ou uma chamada zona morta (recobrimento negativo do êmbolo), o que significa que, em qualquer posição que esteja o êmbolo, o atuador estará abrindo ou fechando. Na ausência de circulação de corrente elétrica pela bobina, o êmbolo é impulsionado para a posição que aciona o fechamento do pistão, através de uma mola interna.

Devido ao comportamento observado, foi levantada a questão: para qual valor de sinal de controle o êmbolo da válvula se mantém em uma posição de repouso, mantendo o atuador (pistão) parado?

Diante dessa questão, o sinal de corrente de saída do driver de potência (DRV01) passou a ser observado. A partir da medição dessa corrente, foi possível a determinação da constante de tempo associada à bobina da válvula proporcional: 110ms.

Após algumas tentativas de controlar a posição do êmbolo da válvula e, então, do pistão hidráulico, variando os ganhos da malha de controle, foi utilizado o sinal *Dither* com frequência definida, o qual gerou bom resultado.

O valor do *Dither* foi ajustado de maneira a não causar movimentação do pistão em função desse sinal. Os valores encontrados para o sinal *Dither* foram 0,4pu de amplitude e 5Hz de frequência de oscilação. Tais valores levaram em conta a constante de tempo da bobina da válvula, determinada anteriormente.

Aplicada tal componente alternada ao sinal de controle, o êmbolo da válvula se movimenta de tal maneira que a resultante dessa variação mantém o distribuidor em repouso, inclusive quando aplicado um comando direto de posição, operando em malha fechada.

Buscando-se o nível ideal de tensão de entrada do driver de potência, de maneira a aplicar tensão e corrente na bobina da válvula dentro de suas características, foram testados os seguintes níveis de entrada:

- 24Vcc: necessitou limitação em 60% no ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) do sinal PWM, a fim de respeitar o limite de tensão máxima na bobina (12Vcc);
- 10Vcc: não apresentou um bom resultado pois o sinal de controle trabalhava muito próximo da saturação (próximo a 90% do PWM);
- 15Vcc: se mostrou o valor mais adequado para essa aplicação.

3.1.3. Conclusões dos ensaios em laboratório

Diante do fato de a válvula não possuir uma posição de repouso, a solução encontrada foi a utilização de um sinal *Dither* com valor relativamente alto. Com isso, o carretel da válvula está sempre com um pequeno movimento, sem no entanto causar oscilações no pistão, garantindo controle estável do distribuidor e das pás da Kaplan.

É aconselhada a utilização de uma fonte de 15Vcc e 15A para alimentação dos módulos DRV01 para as válvulas proporcionais do distribuidor e também das pás, garantindo que, com 100% de *Duty Cycle*, a tensão máxima suportada pelo eletroímã da válvula (19,7Vcc) não seja atingida.

Portanto conclui-se que, com a solução proposta, é possível controlar as posições do distribuidor e das pás da Kaplan de forma eficiente. Tal conclusão deverá ser corroborada com os ensaios em campo.

3.2. Ensaios em Campo

Após a validação da solução em laboratório, evidenciada sua eficácia, os módulos de controle utilizados para os testes em laboratório foram instalados nos painéis de controle do novo regulador, e seguiram para a usina. Os mesmos foram instalados e preparados para o comissionamento.

Os primeiros testes de comissionamento realizados foram aqueles onde a adução de água está fechada e é possível movimentar os pistões desde totalmente fechado até totalmente aberto, testes conhecidos por Ensaios em Água Morta.

Após ajustada a transdução dos pistões, para correto controle em malha fechada, foram aplicados degraus de posicionamento. Desses ensaios, percebeu-se posicionamento preciso dos pistões do distribuidor e das pás da Kaplan, com boa resposta dinâmica e erro nulo em regime permanente. Na Figura 4 são mostradas as respostas a um degrau de 2% na posição do distribuidor e a um degrau de 3% na posição das pás da Kaplan.

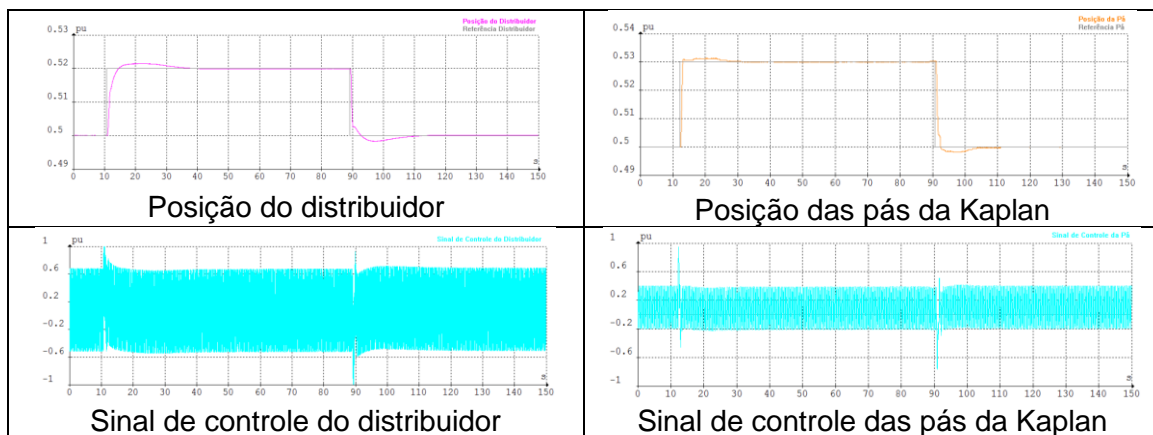


FIGURA 4 – Ensaios em campo – Água morta

A componente alternada presente no sinal de controle de ambas as malhas é causada pelo sinal *Dither*, conforme explicado anteriormente.

Após os ensaios em Água Morta, foram realizados os Ensaios em Vazio, incluindo partida gradativa, partida automática, e degraus na referência de velocidade. Tais ensaios são importantes para, além de ajustar os tempos que a máquina leva para sair da inércia e atingir a rotação nominal, indicar o padrão de ajustes da malha de controle de potência. As oscilografias dos ensaios em vazio não serão abordadas nesse Informe Técnico.

Finalizados os Ensaios em Vazio, foram iniciados os Ensaios em Carga, primeiramente em controle por abertura, para calibrações iniciais. Em seguida, o comissionamento seguiu com o regulador de velocidade operando em controle de

potência ativa, sendo aplicados degraus de diferentes amplitudes para avaliação da resposta dinâmica da máquina operando em carga.

Estando a máquina operando com 75% do carregamento, foi aplicado degrau de 5% na referência de potência, sendo observadas as oscilografias. Conforme mostrado na Figura 5, percebe-se que o controle se mostrou efetivo, apresentando resposta rápida e operação estável a uma variação brusca.

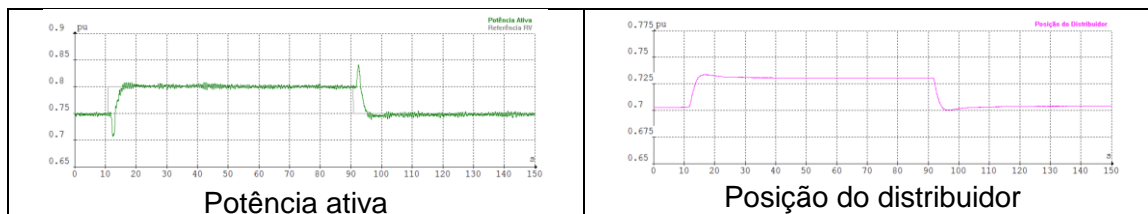


FIGURA 5 – Ensaio em campo – Operação em Carga

Todos os demais testes de comissionamento foram realizados, como rejeições de plena carga, comutações de canal e modo de controle, entre outros. Os resultados obtidos comprovaram que a solução adotada garante operação estável da unidade geradora, com tempos de resposta adequados.

4. CONCLUSÕES

A utilização de um circuito com sinal de saída do tipo PWM para o controle de uma válvula proporcional sem eletrônica embarcada permitiu o acoplamento do novo regulador de velocidade ao sistema hidráulico existente. A resposta dinâmica da unidade geradora apresentou melhora após a instalação do novo sistema, já que o sistema anterior era marginalmente estável em algumas condições de operação. Portanto, a solução se mostrou interessante às centrais que utilizam válvulas sem eletrônica embarcada.

Um fator relevante nesse projeto foi a utilização de tecnologia nacional, impactando no contexto econômico do projeto, aliado ao fato de todo o projeto e documentação do equipamento estarem em Língua Portuguesa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os envolvidos direta ou indiretamente no projeto, nos ensaios em laboratório e nos ensaios em campo, tanto por parte do cliente como colegas da REIVAX.

6. REFERÊNCIAS

- [1] REIVAX – F15004 – Funcionais Elétricos, 2014. Brasil.
- [2] REIVAX – CPX05 – Manual do Usuário, 2015. Brasil.
- [3] REIVAX – MAC01 – Manual do Usuário, 2015. Brasil.
- [4] REIVAX – DRV01 – Manual do Usuário, 2015. Brasil.
- [5] ALSTOM – Catálogo das válvulas ED25, 2010. França.

[6] RVX POWER - Manual de Operação e Manutenção. Projeto Padrão da Linha POWER, 2014. Brasil.

[7] IEEE Std 1207-2011, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units. EUA.

[8] IEC60308 – Hydraulic Turbines – Testing of control systems. CEI/IEC 60308:2005. Suíça.

[9] BUHLER, C., PAIVA, R.B.D. Dedicated Digital System Testing and Modeling in Power Systems. I Latin American Hydro Power and Systems, 2015. Argentina.

[10] BUHLER, C., PAIVA, R.B.D. Importância da Validação de Modelos Através de Ensaios de Campo para Estudos de Regulação Primária e Repotencialização em Usinas Hidrelétricas. XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, 2015. Brasil.